

ESTIMATION DES EFFETS DE LA TORSION DANS LES BÂTIMENTS SOUMIS A L'ACTION SISMIQUE

M. D. Bensalah^{a,c}, A. Modaressi^b, M. Bensaïbi^c, F. L. Caballero^b

a. Département Hydraulique, ENSH, Ecole National Supérieur d'Hydraulique, Route Soumâa, 09000 OULEDYAICH, BLIDA, ALGERIE

b. LMMSS-MAT, CNRS UMR8579, Ecole Centrale Paris (ECP), Grande Voie des Vignes, 92295 CHATENAY MALABRY, FRANCE

c. Département Génie Civil, Université Saad Dahlab, Route Soumâa, 09000 OULEDYAICH, BLIDA, ALGERIE

Résumé :

L'architecture moderne fait appel de plus en plus à des structures irrégulières, dans lesquelles le phénomène de torsion peut se développer lors d'un chargement sismique. Ce phénomène n'est pas simple à définir en raison du fait que ses causes et ses effets sont multiples. Dans les règlements parasismiques, les effets de la torsion sont considérés comme équivalents à des forces statiques appliquées à des distances e_d du centre de rigidité. L'effet est alors ajouté aux forces de cisaillement et aux moments. L'excentricité e_d est composée de deux parties essentielles, la première étant l'excentricité dynamique et l'autre l'excentricité accidentelle pouvant varier entre 5 à 10% dans le plan perpendiculaire à la direction du mouvement du sol. Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier l'influence des effets de la torsion sur le comportement d'une structure asymétrique.

Deux types de structures sont considérés, une symétrique et une autre asymétrique en termes de masse. Elles sont composées d'un seul étage constitué d'un plancher en dalle pleine de béton armé infiniment rigide dans le plan et d'éléments de résistance constitués de poteaux. Nous utilisons un code d'éléments finis qui prend en compte le comportement non linéaire des éléments de la structure. Ce code permet d'effectuer des analyses temporelles en dynamique linéaire et non linéaire ainsi que des analyses statique non-linéaire de poussée progressive. Une base de données de 77 enregistrements sismiques est utilisée. Ces signaux représentent des séismes de magnitude variant entre 6,2 et 7,7.

Les réponses des deux bâtiments sont comparées en termes de déplacement maximum au sommet, de ductilité et de facteur de réduction. Selon nos résultats, le phénomène de torsion réduit la résistance en termes de capacité et augmente la vulnérabilité de la structure. Cela démontre qu'il est très important de tenir compte de la torsion dans la conception parasismique.

Abstract :

Nowadays, buildings with irregular forms are often constructed, in which the torsion phenomenon is induced during seismic loading. This phenomenon is not simple to define due to the fact that its causes and effects are multiple. In building codes, the torsion effects are considered as equivalent static forces applied at distances e_d from the center of stiffness. The effect is then added to shear forces and moments. This eccentricity is composed of two essential parts, the first being the dynamic eccentricity and the other the accidental eccentricity which can vary between 5 to 10% in the plane perpendicular to the direction of ground motion. In this work, we propose to study the effects of induced torsion on the behaviour of an asymmetrical structure.

Two types of structures are considered, one symmetric and one asymmetric in terms of mass. They are one floor reinforced concrete buildings with rigid slab and frame columns. In order to estimate the influence of the torsion effect we use a finite element code which takes into account the nonlinear behaviour of the structural elements. A data base of 77 seismic hazards is used. These signals represent earthquakes with a magnitude varying between 6.2 and 7.7. The responses of the buildings subjected to the seismic hazard are compared in terms of: top displacement (Drift), the ductility and the reduction factor.

According to our results, the torsion phenomenon reduces the strength in terms of capacity and increases the vulnerability of the structure under different seismic hazards. This demonstrates that it is very important to take into account the torsion in the design of buildings subjected to seismic load.

Mots clefs : Torsion, bâtiments asymétriques, non linéaire, séisme, analyses temporelles, analyse

Push over.

1 Introduction

Au cours des dix dernières années, en raison de différentes constatations de dommages engendrés lors des récents tremblements de terre à travers le monde. Plusieurs études ont été menées dans le but de prendre en compte les effets de la torsion sur la réponse des structures soumises aux tremblements de terre.

Dans le but de prendre en compte les effets de la torsion dans les bâtiments asymétriques soumis à l'action sismique, de nombreux travaux ont été réalisés par plusieurs chercheurs qui ont étudié un certain nombre de facteurs qui sont difficiles à prédire et à évaluer. Il s'agit notamment de l'influence du rapport des fréquences latérales et de torsion, l'importance de la conception adéquate des éléments de résistance verticaux des deux côtés du centre de rigidité, les effets de l'excentricité accidentelle qui est due à une variété de causes et les effets de couplage des réponses latérale et de torsion des bâtiments asymétriques [1, 2]. Parmi ces facteurs, nous citons la ductilité qui a fait l'objet de nombreux travaux, ces derniers ont conclu que les effets de torsion sont surtout présents dans le domaine élastique et les premiers stades du comportement plastique et ont tendance à diminuer avec l'augmentation de la déformation plastique. D'où l'amplification du déplacement à la demande en raison des effets de torsion calculée à partir de l'analyse dynamique élastique qui peut être utilisée comme une estimation approximative et conservatrice à la fois dans le domaine élastique et inélastique [3]. Fajfar [4] a conclu, d'une part que la dé-amplification des déplacements sur le côté rigide dues à la torsion, typique de structures élastiques rigide en torsion, diminue généralement avec l'augmentation des déformations plastiques. D'autre part, il a constaté que l'amplification typique de structures élastiques en torsion flexible diminue généralement avec l'augmentation des déformations plastiques. Ces recherches ont été généralement menées en utilisant les méthodes classiques telle que l'analyse dynamique linéaire, l'analyse non-linéaires temporelle (NRHA) et l'analyse statique non-linéaire (NSP). En plus de ces derniers d'autres procédures sont apparues telle que : l'extension de la méthode N2 pour l'analyse sismique pushover Fajfar [4], et l'analyse de poussée modale pour estimer la demande sismique par rapport à une analyse classique à un seul mode de poussée, Chopra et Goel [4]. En outre, les codes sismiques fournissent des dispositions spéciales pour le phénomène de torsion, en termes d'excentricité de conception qui donne le moment de torsion calculée en multipliant la force de cisaillement du plancher avec l'excentricité de conception. L'expression de l'excentricité de conception est composée de deux parties essentielles: l'une appelée excentricité dynamique et l'autre l'excentricité accidentelle. L'excentricité dynamique prend en compte la différence de rigidité, la résistance et les distributions de masse de la structure, alors que l'excentricité accidentelle prend en compte l'incertitude dans le calcul de l'excentricité prise en compte dans la modélisation par rapport à celle déterminée après réalisation de l'ouvrage et les mouvements rotationnelle du sol. Un autre facteur qui influence les effets de la torsion est le facteur de réduction, ce dernier combine l'effet de la résistance (R_s), de la ductilité (R_μ) et de la redondance (R_R) [6]. Le facteur de réduction de conception augmente avec l'augmentation de la ductilité en termes de demande. En outre, les déformations non élastiques augmentent pendant que la force de rendement latérale de la structure diminue et donc le facteur de réduction de conception augmente. En se basant sur des spectres de réponse pour le comportement élastique et non élastique, Newmark et Hall [7] ont observé que dans les moyennes, basses et hautes fréquences, les déplacements spectraux et les forces sont les mêmes pour un système élastique et non élastique. Par contre pour des fréquences modérées, le principe de la conservation de l'énergie est la même que celle d'un système élastique, parfaitement plastique [7].

L'objectif principal du présent travail est d'estimer l'influence des effets de la torsion induite sur le comportement d'une structure asymétrique. C'est pourquoi nous avons considéré deux types de structures l'une symétriques et l'autre asymétriques, afin de voir les effets de certains paramètres précédemment cités.

Notre étude porte spécifiquement sur les paramètres suivants: la ductilité et le facteur de réduction (R_e).

Pour cela, la ductilité et le facteur de réduction sont calculés dans les deux structures. Ces paramètres sont comparés pour les différents séismes utilisés en termes d'intensité Arias et de la période moyenne. L'analyse des deux structures a été réalisée avec le logiciel éléments finis GEFDYN [8], [9].

2 Description des cas étudiés

Nous allons donner dans ce qui suit les principales hypothèses et calculs sur lesquels se base notre étude.

2.1 Caractéristiques du model

Les caractéristiques du modèle choisie pour représenter les deux types de structures est un modèle à un seul étage constitué d'éléments de contreventement de type portique et d'un plancher dalle. Les sections transversales du modèle choisis pour représenter les deux types de structures (c.-à-d. structure asymétrique et symétrique) sont indiquées (voir figure 1a et 1b respectivement). La rigidité des poteaux est la même pour les deux types de structures (c.-à- d $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k$), La masse de la dalle est supposée uniformément répartie le long des éléments de la poutre et les colonnes sont censées être sans masse. Il est également supposé que la dalle des deux structures est infiniment rigide dans son propre plan. Par ailleurs, nous avons la même masse répartie sur deux poutres dans le cas d'une structure symétrique (i.e $m_1 = m_2 = m$), tandis que dans le cas asymétrique une masse répartie linéairement est rajouté dans l'une des poutres c'est à dire $m_1 = m$ et $m_2 = 0.88m$. Dans ce modèle on considère les six degrés de liberté.

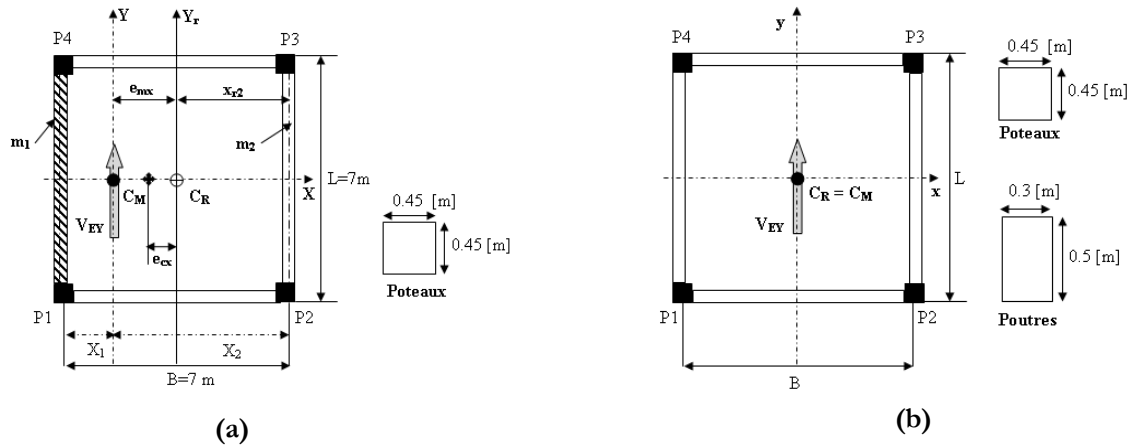


FIG. 1– Description de la géométrie en plan et section transversale des deux structures.

En ce qui concerne la masse total, elle est de 87.1t dans le cas de la structure asymétriques et 92.4 t dans le cas symétrique, le module élastique E des deux structures est égal à 33,4 GPa et coefficient de Poisson est $\nu = 0,2$. L'analyse dynamique élastique, donne une fréquence fondamentale (f_{str}) de 4,98 Hz et 4,81 pour les structures symétriques et asymétriques, respectivement. Afin d'introduire les propriétés non-linéaires des éléments de résistances, les propriétés élasto-plastiques des éléments de contreventement ont été utilisées. La figure 2 montre le diagramme ($M-N$) moment de flexion et forces axiale qui contrôlent la limite de plasticité des poteaux des deux structures.

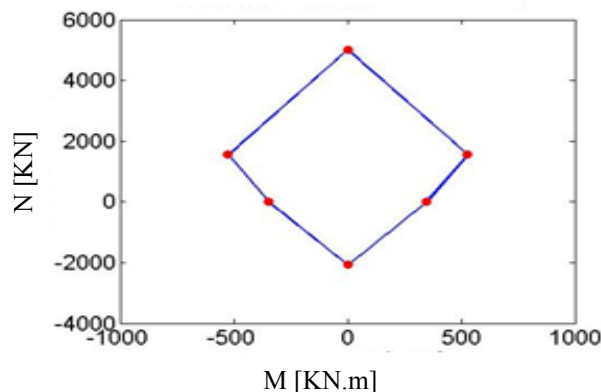


FIG. 2– Diagramme N-M (effort axial-moment flexion).

La ductilité a été calculée pour les deux cas de structure considérée. Tout d'abord, dans le cas de la structure symétrique la demande en ductilité du système en termes de déplacement a été calculée par la formule suivante [10]:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

Où, Δ_u est le déplacement ultime inélastique et Δ_y est le déplacement limite élastique du système. Dans le cas de la structure asymétrique la demande en ductilité dépend des deux angles de torsion du système (θ_{tu} et θ_{to}). Le premier correspond à l'angle ultime de torsion θ_{tu} qui dépend de la rigidité en torsion et le moment de torsion du système. Il est défini comme suite:

$$\theta_{tu} = \frac{M_{tor}}{K_{tor}} = \frac{e_{cx} \sum_i V_{yi}}{\sum_i y_i^2 K_{xi} + \sum_i x_i^2 K_{yi}} \quad (2)$$

Où, M_{tor} est le moment de torsion; V_{yi} est l'effort tranchant à la base dans la direction y; e_{cx} est l'excentricité dynamique induit par le moment de torsion et K_{tor} la rigidité en torsion du système. En outre, sachant que le déplacement ultime Δ_u obtenu dans le cas asymétrique n'est pas nécessairement identique dans les deux cotés rigides (Δ_{u1}) par rapport à celui flexible (Δ_{u2}), θ_{to} est l'angle optimal de la torsion qui correspond à l'excentricité de résistance et doit être calculée par la formule suivante:

$$\theta_{to} = \frac{\Delta_{u1} - \Delta_{u2}}{L} \quad (3)$$

La demande en ductilité en terme de déplacement doit être limitée à:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{(\Delta_{u1} + X_1 \theta_{tu})}{\Delta_y} \quad (4)$$

Dans lequel l'angle ultime de torsion, θ_{tu} , se trouve être inférieur à la valeur optimale, donnée par l'équation (2). Toutefois, lorsque $\theta_{tu} > \theta_{to}$, la demande en ductilité système de déplacement doit être limitée à :

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{(\Delta_{u2} - X_2 \theta_{tu})}{\Delta_y} \quad (5)$$

Où, X_1 est la distance à partir de l'élément $P1$ du centre de masse et X_2 est la distance à partir de l'élément $P2$ du centre de masse. En ce qui concerne le facteur de réduction R_e , il reflète la capacité de la structure à dissiper l'énergie en adoptant un comportement inélastique. Cela ne dépend pas seulement des caractéristiques du système, mais aussi du mouvement du sol influencé par la période de vibration et le ratio de ductilité en déplacement [9]. Ce facteur est défini comme le rapport de la demande de la force élastique sur la force inélastique :

$$R_e = \frac{F_{el}}{F_y} \quad (6)$$

Où, F_{el} est le maximum de la résistance latérale élastique obtenu à partir de l'analyse linéaire, et F_y est la résistance latérale inélastique obtenu à partir de l'analyse non-linéaire [11].

2.2 Séisme

Les mouvements sismiques utilisées sont: Cap Mendocino -1992, -1983 Coalinga, Imperial Valley-1994, Landers-1992, Loma Prieta-1989, Northridge-1994, San Fernando-1971, NewZealand-1987 et de Chi-Chi-1999. L'intensité d'Arias (*Iarias*) [12] est une mesure de gravité tremblement de terre qui est bien corrélée

avec plusieurs mesures structurelles de la demande. Cette intensité est définie comme:

$$I_{Arias} = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt \quad [\text{m/s}] \quad (7)$$

où, $a(t)$ est l'accélération du sol et T_d la durée du tremblement de terre. L'effet de la période moyenne $T_m(s)$ est également étudié [12]. Les plages de variation de ces paramètres pour les mouvements d'entrée utilisés sont rapportées dans le tableau 2.

Table 2. Caractéristiques des séismes utilisés.

Paramètre	Plage
I_{Arias} (m/s)	0.05-6.21
T_m (s)	0.22-1.32

Tous les signaux sont compatibles avec les spectres de réponse de type A du sol de l'Eurocode8.

3 Résultats et discussions

Afin d'étudier l'importance du phénomène de torsion sur le comportement structurel, trois types d'analyses dans le domaine temporel ont été effectuées: statique non-linéaire push-over, linéaires et analyse dynamique non linéaires. Dans toutes les analyses, la sollicitation est unidirectionnelle. Les résultats obtenus en termes de résistance latérale ultime (V_u) respectivement dans les structures asymétriques et symétriques est représenté sur la figure 3a et 3b. Ils démontrent que la résistance latérale reste la même dans les deux cas de figure.

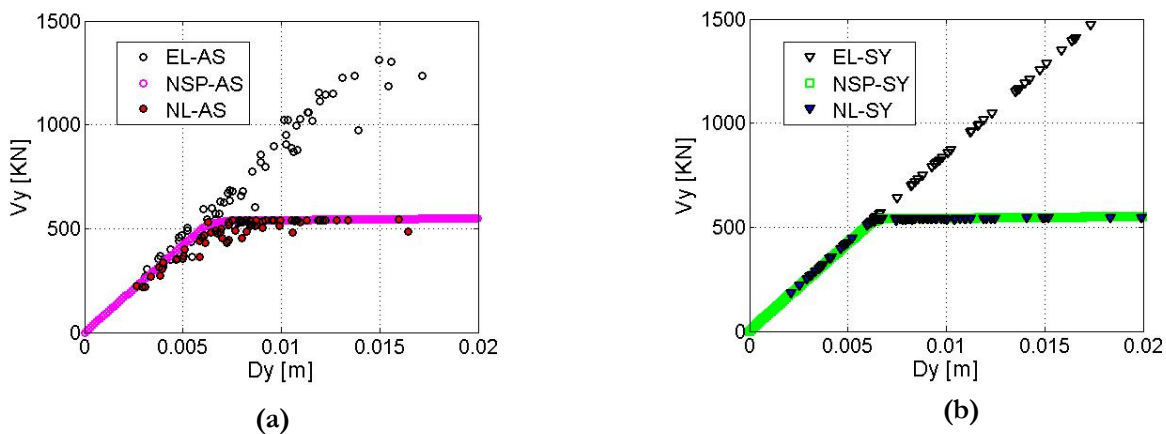


FIG. 3— Schéma de l'effort tranchant à la base par rapport au déplacement au sommet obtenu en dynamique et Pushover (NSP) d'essai chargé dans la direction y pour le cas: élastique (EL), élasto-plastique (NL) des structures asymétriques (AS) et symétriques (SY).

Pour voir les effets du mouvement du sol entrée sur la réponse des structures, on peut comparer la variation du déplacement ultime au sommet $D_{i,y}$ avec une intensité Arias et la période prédominante. Tout d'abord, il convient de noter que plus de 56% des séismes utilisés ont plastifié la structure pour les deux cas symétriques et asymétriques figure 4. En outre, le déplacement de tête obtenu dans la structure symétrique est toujours plus élevé que celle obtenue dans le cas asymétrique. Cet effet est dû au fait que la rigidité est la même pour les deux cas de structures mais sachant que la masse dans le cas asymétriques est inférieure à celle symétriques par conséquent la force excitatrice est supérieure dans le cas symétriques d'où cette différence des déplacements. On constate une dépendance significative du déplacement en tête avec les deux paramètres de mouvement d'entrée considérée (I_{Arias} et T_m) figures 4 et figure 5.

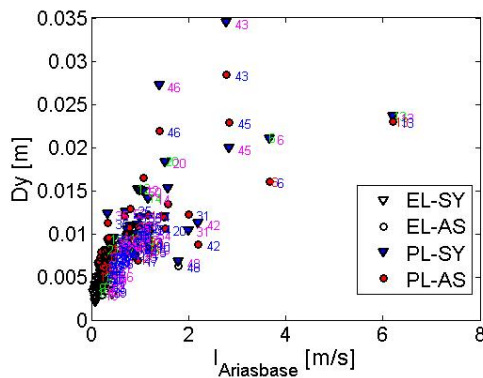


FIG. 4– Influence du mouvement du sol d'entrée sur le déplacement dans des directions y top.

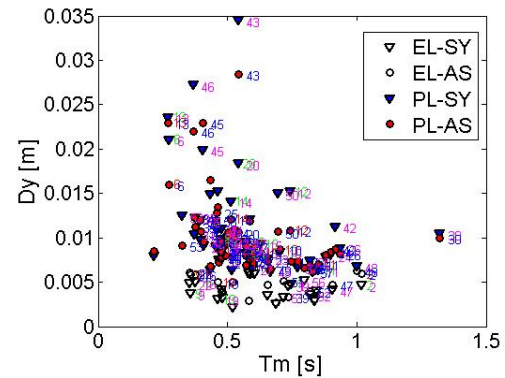


FIG. 5. – Influence de la période moyen sur le déplacement dans des directions y top.

En termes de ductilité et comme le montre la Figure 6, aucune corrélation particulière ne peut être observée avec les données considérées comme des paramètres. L'évolution des facteurs de réduction est montrée dans la figure 7. On constate que le facteur de réduction augmente avec l'intensité du séisme.

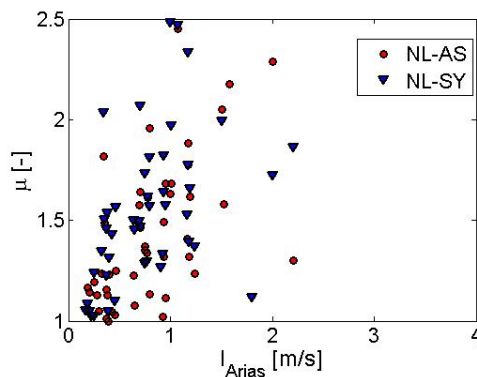


FIG. 6– Influence du mouvement du sol sur la ductilité.

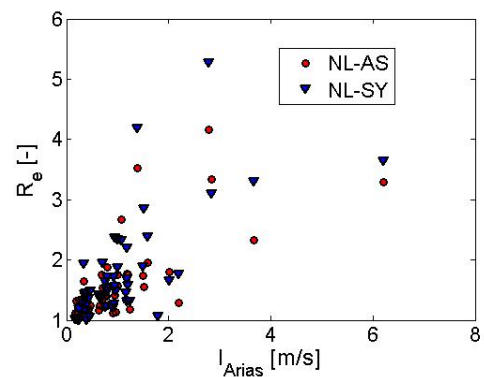


FIG. 7– Influence du mouvement du sol sur le facteur de réduction.

4 Conclusions

Les résultats obtenus dans les deux cas de structures ont montré que la réponse en torsion dans les structures soumises à des charges sismiques peut être influencée par de nombreux paramètres. Nous avons présenté certains de ces effets en prenant en compte le facteur de réduction, la ductilité et le déplacement ultime au sommet. Une base de données sismique de 77 tremblements de terre a été utilisée. Nous avons constaté que, pour les cas étudiés, une corrélation significative est observée pour le déplacement ultime au sommet et le facteur de réductions ou la ductilité avec l'intensité Arias ou la période moyenne du séisme. Dans ce travail nous avons seulement étudié l'existence d'un comportement non-symétrique dû à la différence de la masse. L'influence de la différence dans la rigidité doit être considérée. La bi-directionnalité du mouvement

sismique a une grande influence et devrait être également étudiée. Pour généraliser les résultats obtenus, et étudier l'existence de corrélations entre les caractéristiques structurelles et les paramètres d'entrée (i.e séisme), l'étude paramétrique doit être poursuivie.

Références

- [1] K.G Stathopoulos, S.A. Anagnostopoulos. Accidental design eccentricity: Is it important for the inelastic response of buildings to strong earthquakes? *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp 782-791, December, 2009.
- [2] I. Ciongradi, M. Budescu. Evaluation of the Seismic Torsion Effects on structures, *EOvidius University Annals of Constructions* 3,4, pp 65-72, April, 2002.
- [3] E. Erduran. Assessment of current nonlinear static procedures on the estimation of Torsional effects in low-rise frame buildings, *Engineering Structures* 30, pp 2548-2558, April, 2008.
- [4] P. Fajfar, D. Marusic and I. Perus. Torsional effects in the Pushover-Based Seismic Analysis of buildings, *Journal of Earthquake Engineering* Vol 9, No. 6, 831-854, March, 2005.
- [5] H. Shakib. Evaluation of dynamic eccentricity by considering soil-structure interaction: a proposal for seismic design codes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering journal* soil dynamic 24, 369-378, January, 2004.
- [6] P. Bhavin, S. Dhara. Formulation of response reduction factor for RCC framed staging of elevated water tank using static pushover analysis, *Proceedings of the World congress on Engineering* Vol 3, WCE, 2078-958, June, 2010.
- [7] E. Miranda, M. Eeri and V. Bertero, M. Eeri. Evaluation of strength reduction factors for earthquake – resistant design, *Earthquake Spectra*, Vol. 10, No 2, pp 357-379, August, 1994.
- [8] D. Aubry, D. Chouvet, A. Modaressi, H. Modaressi, *GEFDyn: Logiciel d'Analyse de Comportement Mécanique des Sols par Elments Finis avec Prise en Compte du Couplage Sol-Eau-Air*. Manuel scientifique, Ecole Centrale Paris, LMSS-Mat; 1986.
- [9] D. Aubry, A. Modaressi, *GEFDyn: Manuel scientifique*. Ecole Centrale Paris, LMSS-Mat; 1996.
- [10] T. Paulay. A Simple Seismic design strategy Based on Displacement and Ductility Compatibility, *Earthquake Engineering and Engineering Seismology* Vol.1, N.1, 51-67, September, 1999.
- [11] E. Miranda, M. Eeri and V. Bertero, M. Eeri. Evaluation of strength reduction factors for earthquake – resistant design, *Earthquake Spectra*, Vol. 10, No 2, pp 357-379, August, 1994.
- [12] I. Iervolino, C.A. Cornell. Record Selection for Nonlinear Seismic Analysis of structures, *Earthquake Spectra*, Volume 21, No 3, pp 685-713, August, 2005.
- [13] E. Saez, F. Lopez-Caballero, M. Modaressi. Effects of SSI on the Capacity Spectrum Method, *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Paper: 1073, pp 3-8 September, 2006.